

УДК 621.7

Я.Н. Гаращенко, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## **ВОЗМОЖНОСТИ ВИЗУАЛЬНОГО И СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРИМЕНИМОСТИ ДЕКОМПОЗИЦИИ ИЗДЕЛИЯ ПРИ ЕГО ПОСЛОЙНОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ**

*Представлено результати дослідження можливостей візуальної оцінки ефективності застосування структурної зворотної декомпозиції на основі аналізу розподілу елементарних об'ємів (воксельної 3D-моделі) виробу за підпросторами, одержуваним шляхом розбиття робочого простору. Апробація візуальної оцінки і статистичного аналізу розподілу елементарних об'ємів здійснювалось з використанням моделей промислових виробів.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, технологическая подготовка, воксельная модель, структурная обратимая декомпозиция

*Представлены результаты исследования возможностей визуальной оценки эффективности применения структурной обратимой декомпозиции на основе анализа распределения элементарных объемов (воксельной 3D-модели) изделия по подпространствам, получаемым путем разбиения рабочего пространства. Апробация визуальной оценки и статистического анализа распределения элементарных объемов выполнялась с использованием моделей промышленных изделий.*

**Ключові слова:** адитивні технології, технологічна підготовка, воксельного модель, структурна оборотна декомпозиція

*The results of a study of the possibilities of visual evaluation of effectiveness of structural reversible decomposition based on analysis of the distribution of elementary volumes (voxel 3D-model) of product on subspaces obtained by dividing the workspace are presented. Testing of visual evaluation and statistical analysis of the distribution of elementary volumes was performed using industrial product models.*

**Keywords:** additive technologies, technological preparation, voxel model, structural reversible decomposition

**Введение.** На первоначальном этапе конструкторской и технологической подготовки представляет интерес оценка приспособленности конструкции к эффективной реализации оптимизационных задач. Одной из основных задач технологической подготовки аддитивного производства является структурная обратимая декомпозиция изделия [1]. Как правило, структурную декомпозицию используют для крупногабаритных изделий, размеры которых превышают размеры платформы установки [2]. Решение данной задачи позволяет достаточно существенно уменьшить время изготовления и увеличить удельный используемый объем рабочего пространства установки [3].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Структурная декомпозиция изделия, как правило, является первой задачей, выполняемой при технологической подготовке, так как определяет геометрические и

технологические ограничения для последующих задач (последовательность решаемых задач представлена на рис. 1).

Работа [4] является одной из первых решавших задачу рационального использования рабочего пространства путем декомпозиции изделия. При этом триангуляционная модель переводилась в растровое (воксельное) представление.

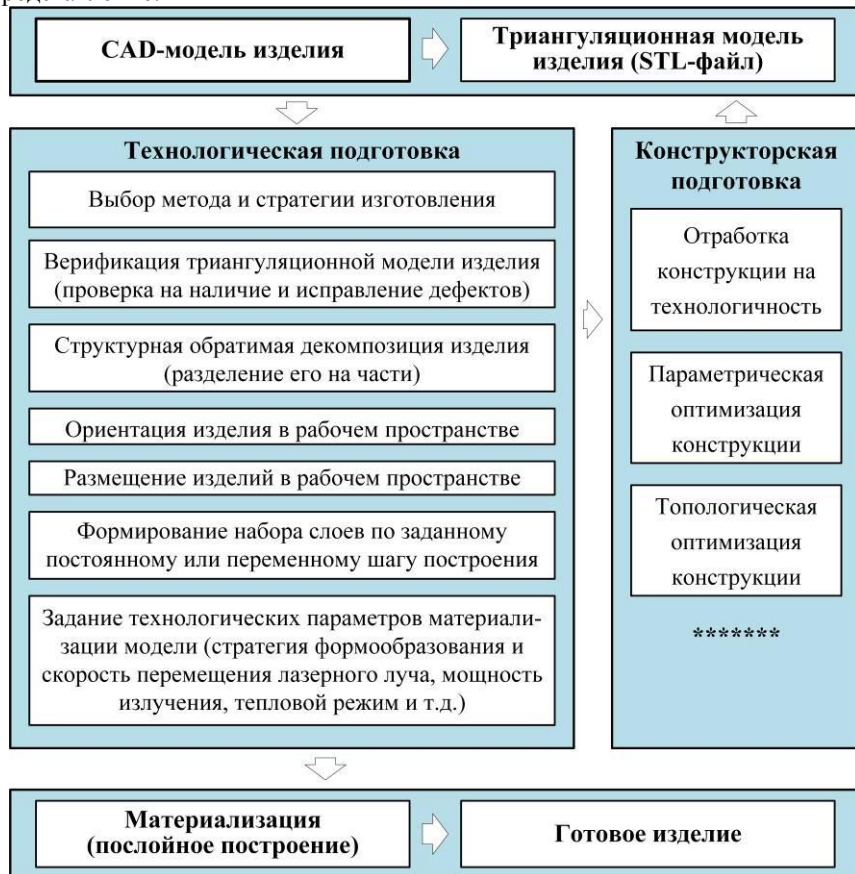


Рисунок 1 – Задачи технологической подготовки к материализации изделия аддитивными технологиями

Декомпозицию изделия выполняют различными способами рассечения 3D-модели. В работах [3, 5, 6] рассечение модели осуществляется плоскостями по выбранному критерию. В работах [2, 3] – время формообразования, в [5, 6] – площадь контакта с поддерживающими структурами, а также в [5] – объем поддерживающих структур.

Достаточно распространено выполнение декомпозиции с образованием частей изделия с минимальной сложностью геометрической формы поверхностей [7–10]. Такие методы построены на основе кластерного анализа триангуляционной модели [7, 8] или сочетания кластерного и спектрального анализа по набору морфометрических характеристик [9]. В работе [10] разбиение на части изделия осуществлялось на основе оценки кривизны поверхности по ориентации ребер триангуляционной модели.

Наполнение рабочего пространства установки в форме параллелепипеда будет наибольшим при размещении частей изделия такой же формы. Поэтому в ряде работ [8, 11–13] декомпозицию изделия выполняют с использованием параллелепипедов или призм с заданными размерами. Но такой подход имеет ограничения в применении для тонкостенных изделий [13].

Одним из направлений исследований, направленных на повышение эффективности оценки технологичности, совершенствование конструкции и стратегии изготовления аддитивными технологиями является развитие инструментов визуального анализа исследуемых признаков [14].

В качестве наиболее представительного исследуемого признака 3D модели для визуального (цветового) анализа было выбрано распределение элементарных объемов изделия в рабочем пространстве установки. Данный исследуемый признак является наиболее значимым из геометрических свойств конструкции, т.к. определяет наполняемость рабочего пространства размещаемыми изделиями.

В данной работе сделано предположение, что визуальный и статистический анализ пространственного распределения элементарных объемов изделия позволит выполнять предварительную оценку эффективности его декомпозиции. Использование воксельной модели предоставляет возможности для анализа пространственного распределения элементарных объемов (вокселей материала) изделия.

**Целью** работы является изучение возможностей визуального и статистического анализа объемного распределения материала изделия (на основе анализа воксельной 3D-модели) для оценки его влияния на используемый удельный объем рабочего пространства установки аддитивных технологий.

**Подсистема статистического анализа воксельной 3D-модели изделия.** Исследование выполнялось с использованием подсистемы создания и статистического анализа воксельной 3D-модели изделия. Данная подсистема входит в систему технологической подготовки материализации сложных изделий аддитивными технологиями, разработанной на кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" НТУ "Харьковский политехнический институт" (Украина). Данная система позволяет выполнять оценку технологичности конструкции и эффективности решения задач технологической подготовки аддитивного производства на основе

статистического анализа исследуемых признаков полигональной, воксельной и послойной модели изделия.

Экранные формы разработанной подсистемы создания и анализа воксельной 3D-модели представлены на рис. 2–4.

Разработанная подсистема представляет пользователю следующие основные возможности задания параметров и режимов работы с последующей визуализацией результатов:

- создание воксельной 3D-модели изделия на основе полигональной (STL-файла) с учетом размеров вокселей  $\square_x$ ,  $\square_y$ ,  $\square_z$  (рис. 2);
- сохранение воксельной модели в файл формата ASC для анализа в сторонних программах (CAD-системах);
- статистический анализ и построение гистограмм распределения вокселей 3D-модели по осям X, Y, Z (рис. 3) и по подпространствам рабочего пространства (рис. 4);
- определение основных статистических характеристик (12 параметров выводятся на экранную форму, показанную на рис. 3);
- вывод формы визуализации результатов анализа в виде плотности или интегральной функции вероятности.

Возможность вывода статистических характеристик и гистограмм распределения количества вокселей по осям X, Y, Z (рис. 3) позволяет количественно и визуально оценивать особенности распределения материала.

**Предварительный анализ 3D-модели**

**Создание воксельной 3D-модели**

**Сохранение воксельной 3D-модели в ASC-файл**

**Проверка адекватности воксельной 3D-модели**

**Отклонения воксельной от триангуляционной 3D-модели**

Структура: Обратимая декомпозиция

Открыть STL | Импорт STL в БД | Создание воксельной модели | Анализ воксельной модели

Исх. данные | Создание воксельной модели | Сохранить файл ASC | Проверка | Сохранить модель | Открыть модель

Количество вокселей модели: 23696  
 Количество вокселей свободного пространства: 29224  
 Расчетное количество вокселей (общее): 48748  
 Размеры вокселя (по осям X, Y, Z): 2; 2; 2  
 Объем воксельной модели: 189568 (мм<sup>3</sup>)  
 Время создания: 4 704 мс.  
 Площадь триангуляционной модели: 43 283,847 mm<sup>2</sup>  
 Объем триангуляционной модели: 196 096,000 mm<sup>3</sup>  
 Объем воксельной модели: 189 568,000 mm<sup>3</sup>  
 Потребность создания воксельной модели по объему: -3,3%.  
 Коэффициент заполнения объема: 44,8%.  
 Время проверки: 41 мс.

Исходные данные			
	Ось X, мм	Ось Y, мм	Ось Z, мм
Мин.	0.00	-42.92	-42.92
Макс.	60.00	42.92	42.92
Размеры	60.00	85.85	85.85
Воксель	<input checked="" type="checkbox"/> 2.00	<input checked="" type="checkbox"/> 2.00	<input checked="" type="checkbox"/> 2.00
Расчетное количество вокселей:	48 748		

Воксельная модель			
	Ось X, мм	Ось Y, мм	Ось Z, мм
Мин.	1.00 / 0.00	-41.92 / 42.92	-41.92 / 42.92
Макс.	59.00 / 60.00	40.08 / 41.08	40.08 / 41.08
Размеры	58.00 / 60.00	82.00 / 84.00	82.00 / 84.00
Отклонения	0.00 мм / 0.0 %	1.85 мм / 2.2 %	1.85 мм / 2.2 %
Количество/объем вокселей:	23 696 / 189 568.00		

Выполнена проверка модели.

Рисунок 2 – Экранная форма подсистемы создания воксельной модели

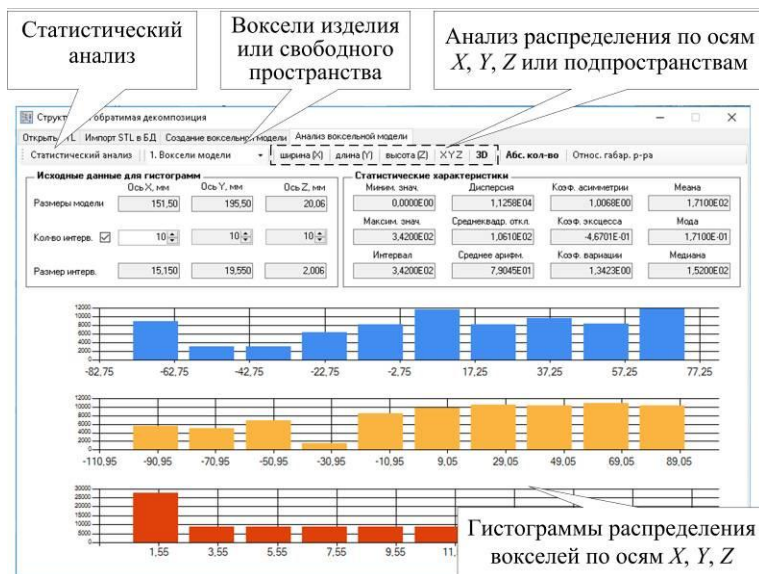


Рисунок 3 – Экранная форма статистического анализа распределения вокселей (материала изделия и свободного рабочего пространства) по осям X, Y, Z

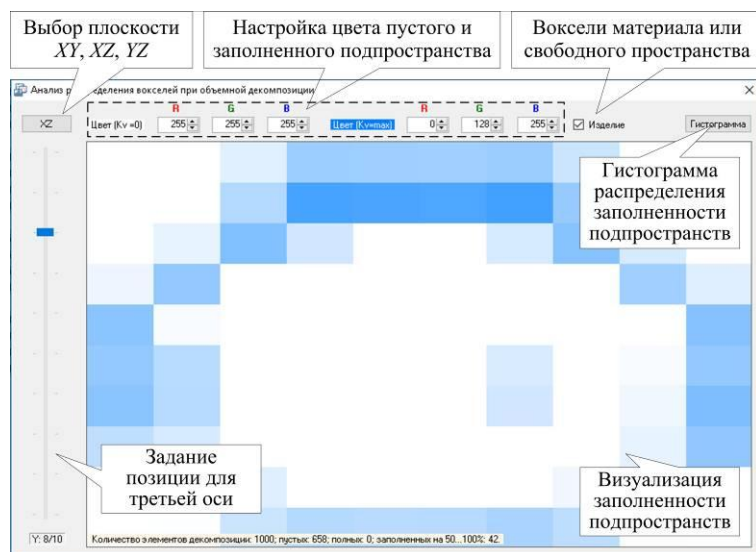


Рисунок 4 – Визуализация распределения относительного количества вокселей по подпространствам

Рассмотрение рабочего пространства в виде совокупности подпространств дает возможность оценивать пространственное распределение материала. Предусмотренный статистический анализ (рис. 3) с визуализацией распределения вокселей по подпространствам (рис. 4) позволяет оценивать их наполненность материалом изделия. Реализация такого подхода создает основу для обоснованного применения декомпозиции.

**Анализ пространственного распределения материала изделий.** Исследование возможностей визуальной оценки применимости структурной обратимой декомпозиции выполнялось на примере небольшого ряда моделей промышленных изделий представленных на рис. 5.

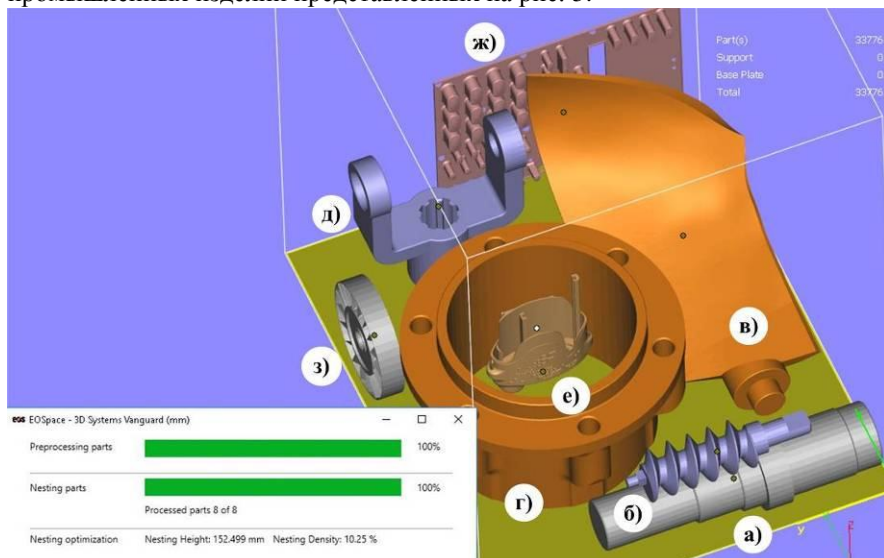


Рисунок 5 – Тестовые модели промышленных изделий:  
 а – вал; б – шпек; в – лопасть; г – корпус; д – карданный вал;  
 е – крышка; ж – панель; з – вентилятор

Визуальный и статистический анализ распределения элементарных объемов (материала) изделия в пространстве выполнялось на основе анализа воксельной модели. Алгоритм анализа включал следующие действия:

- формирование воксельной модели рабочего пространства на базе триангуляционной 3D-модели исходя из размеров вокселей  $v_u(\square_x, \square_y, \square_z)$  и габаритных размеров изделия  $U_{ws}(L_{part}, W_{part}, H_{part})$  или рабочего пространства послойного построения установки  $U_{ws}(L_x, L_y, H_z)$ ;

- формирование подпространств  $U_i$  с учетом заданного количества разбиений пространства  $U_{ws}$  по каждой из координатных осей  $X, Y, Z$ ;

– анализ распределения материала изделия (относительного количества вокселей материала  $K_{Vi}$ ) по частям разбиения (подпространствам  $U_i$ ) рабочего пространства  $U_{ws}$  (рис. 4, 6).

Первым действием формируется воксельная модель рабочего пространства  $U_{ws}$ . Такая модель представляет собой множество вокселей  $U_{ws} = \{v_{u1}, v_{u2}, \dots, v_{un}\}$  с координатами по осям  $X, Y, Z$ . Воксельная модель  $U_{ws}$  включает воксели материала изделия  $P = \{v_{u1}, v_{u2}, \dots, v_{un}\}$  и свободного пространства (без материала)  $F = \{v_{u1}, v_{u2}, \dots, v_{un}\}$ , т. е.  $P \in U_{ws}$ ,  $F \in U_{ws}$  при условиях  $P \cup F = U_{ws}$  и  $P \cap F = \emptyset$ .

Последующее действие путем разбиения рабочего пространства  $U_{ws}$  формирует подпространства  $U_1, U_2, \dots, U_i \in U_{ws}$  с обеспечением условий:

$$U_1 \cup U_2 \cup \dots \cup U_i = U_{ws};$$

$$U_1 \cap U_2 \cap \dots \cap U_i = \emptyset.$$

Определение принадлежащих подпространствам  $U_i$  вокселей материала  $P_i \in P$  и свободного пространства  $F_i \in F$  с обеспечением условий:

$$P_i \cup F_i = U_i; P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_i = P; F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_i = F.$$

Апробация алгоритма выполнялась на тестовых моделях промышленных изделий, представленных на рис. 5. Гистограммы распределения материала по подпространствам  $U_i$ , создавались на примере тестовых моделей (при формировании  $10^3$  подпространств). В общем, при исследовании рабочее пространство разбивалось на  $N_p = 3^3 - 10^3$  подпространств (3–10 частей по каждой координатной оси). Такое количество  $N_p$  является достаточным с учетом выявленных ограничений  $N_D$  (табл. 1) и необходимым для выявления подпространств, не имеющих вокселей материала ( $P_i \in \emptyset$ ). Также принято допущение – разбиение на подпространства выполнять относительно собственных габаритных размеров изделия. Такой подход позволяет получать результаты исследования независимо от габаритных размеров рабочей платформы выбранной установки.

На рис. 6 представлены гистограммы распределения относительной наполненности материалом подпространств на примерах тестовых изделий. В случае вала (рис. 6) наблюдается существенно большее количество подпространств с минимальным  $K_{Vi} \in [0, 0.1]$  и наибольшим  $K_{Vi} \in [0.9, 1]$  наполнением.

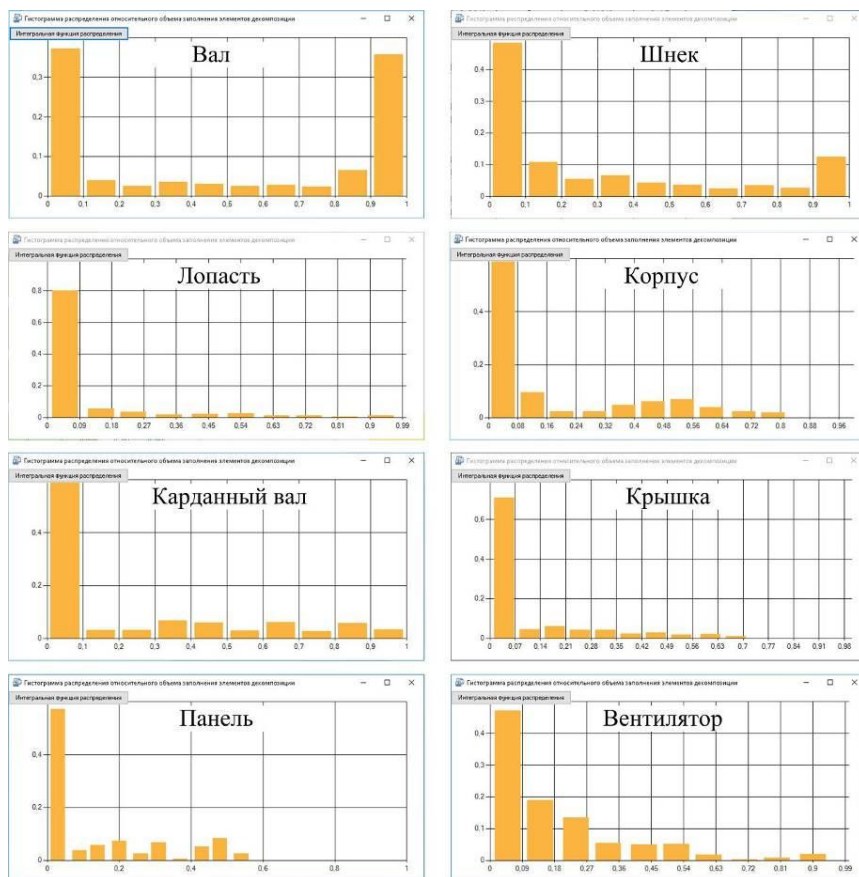


Рисунок 6 – Гистограммы распределения относительного содержания материала тестовых изделий по подпространствам

В случае корпуса наблюдается более половины подпространств (58 %) с минимальным наполнением  $K_{Vi} \in [0, 0.1)$ . Для вентилятора 46 % подпространств имеют наполненность материалом изделия  $K_{Vi} \in [0, 0.1)$ . Отличительным признаком от вала и корпуса является достаточно большое количество (32 %) подпространств с наполнением  $K_{Vi} \in [0.1, 0.3)$ .

Представленные результаты статистического анализа распределения элементарных объемов изделий по подпространствам демонстрируют достаточную информативность для предварительной оценки целесообразности применения структурной обратимой декомпозиции изделий получаемых послойным построением.



**Выводы по результатам исследования.** В разработанной подсистеме создания и статистического анализа воксельной 3D-модели изделия встроено инструменты статистического анализа для исследования распределения элементов воксельной модели изделия по подпространствам принадлежащим рабочему пространству установки. Предлагается для количественной оценки пространственного распределения вокселей – основные статистические характеристики. Для визуального анализа – цветовая визуализация наполненности подпространств материалом (относительного количества вокселей изделия) и гистограммы плотности (или интегральной функции) вероятности распределения исследуемого признака.

На основе результатов статистического анализа воксельной модели изделия представляется возможным выявление показателей прогнозируемой эффективности применения структурной обратимой декомпозиции. Такие показатели представляют интерес для принятия обоснованного решения по рациональному применению декомпозиции для максимизации удельного используемого объема рабочего пространства установки аддитивных технологий.

**Список использованных источников:** 1. Gogate A. Intelligent layout planning for rapid prototyping [Текст] / A.S. Gogate, S.S. Pande // Int J Prod Res. — 2008. — 46(20). — P. 5607—5631. 2. Sung-Min H. Determination of fabricating orientation and packing in SLS process [Текст] / H. Sung-Min, C. Kyung-Hyun, L. Seok-Hee, C. Pok-Keun // Journal of Materials Processing Technology. — 2001. — Vol. 112, Issues 2–3. — P. 236—243. 3. Бумтязов Ю.Б. Расширение технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии [Текст]: Дис... канд. техн. наук / Ю. Б. Витязев. — Харьков, 2004. — 228 с. 4. Han, G.C. New approach for nesting problem using part decomposition technology [Текст] / G.C. Han, S.K. Kim // IEEE Xplore Conference: Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. 23rd International Conference on. — 1997. — Vol. 3. — P. 1234—1239. 5. Ilinkin I. A decomposition-based approach to layered manufacturing [Текст] / I. Ilinkin, R. Janardan, J. Majhi, J. Schwerdt, M. Smid, R. Sriram // Computational Geometry. — 2002. — Vol. 23, Issue 2. — P. 117—151. 6. Yu E.A. Evolutionary decomposition for 3D printing / E.A. Yu, J. Yeom, C.C. Tutum, E. Vouga, R. Mäikkulainen // In Proceedings of GECCO'17, Berlin, Germany, July 15-19. — 2017. — P. 1272—1279. 7. Vanek J. PackMerger: a 3D print volume optimizer [Текст] / J. Vanek, J. Garcia, B. Benes, R. Mech, N. Carr, O. Stava, G. Miller // Computer Graphics Forum 33, 6. — 2014. — P. 322—332. 8. Ruizhen Hu. Approximate pyramidal shape decomposition [Текст] / Hu Ruizhen, Li Honghua, Zhang Hao, Cohen-Or. Daniel // A CMTrans on Graph 33, 6. — 2014. — P. 12. 9. Shamir, A. A survey on mesh segmentation techniques [Текст] / A. Shamir // Computer Graphics. Forum 27, 6. — 2008. — P. 1539—1556. 10. Hao J. An efficient curvature-based partitioning of large-scale STL models [Текст] / J. Hao, L. Fang, R. Williams // Rapid Prototyping Journal. — 2011. — 17, 2. — P. 116—127. 11. Luo L. Chopper: Partitioning Models into 3D-Printable parts [Текст] / L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewicz, W. Matusik // ACM Transactions on Graphics. — 31(6). — 2012. — 9 p. 12. 3D (three-dimensional) printing-oriented model decomposition and arrangement method [Текст]: пат. 105427374 China: MIK B33Y50/02, G06T17/00 / Chen Xuelin, Lyu Lin, Chen Baoquan. — № CN20151762458; заявл. 10.11.2015; опубл. 23.03.2016. 13. Xuelin C. Dapper: decompose-and-pack for 3D printing [Текст] / Chen, Xuelin et al. // Acm transactions on graphics. — 2015. — vol. 34, no. 6, 4. — 12 p. 14. Barnawal, Prashant. Design and evaluation of feedback system in design for manufacturability [Текст]. Graduate Theses and Dissertations. 14789. — 2015. <http://lib.dr.iastate.edu/etd/14789>.

- Bibliography (transliterated):** 1. *Gogate A.* Intelligent layout planning for rapid prototyping [Текст] / *A.S. Gogate, S.S. Pande* // *Int J Prod Res.* — 2008. — 46(20). — P. 5607—5631. 2. *Sung-Min H.* Determination of fabricating orientation and packing in SLS process [Текст] / *H. Sung-Min, C. Kyung-Hyun, L. Seok-Hee, C. Pok-Keun* // *Journal of Materials Processing Technology.* — 2001. — Vol. 112, Issues 2–3. — P. 236—243. 3. *Vitjazez Ju.B.* Rasshirenie tehnologicheskikh vozmozhnostej uskorennoogo formoobrazovanija sposobom stereolitografii [Текст]: Dis... kand. tehn. nauk / *Ju.B. Vitjazez.* — Har'kov, 2004. — 228 s. 4. *Han, G.C.* New approach for nesting problem using part decomposition technology [Текст] / *G.C. Han, S.K. Kim* // *IEEE Xplore Conference: Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. 23rd International Conference on.* — 1997. — Vol. 3. — P. 1234—1239. 5. *Ilinkin I.* A decomposition-based approach to layered manufacturing [Текст] / *I. Ilinkin, R. Janardan, J. Majhi, J. Schwerdt, M. Smid, R. Sriram* // *Computational Geometry.* — 2002. — Vol. 23, Issue 2. — P. 117—151. 6. *Yu E.A.* Evolutionary decomposition for 3D printing / *E.A. Yu, J. Yeom, C.C. Tutum, E. Vouga, R. Miikkulainen* // *In Proceedings of GECCO'17, Berlin, Germany, July 15-19.* — 2017. — P. 1272—1279. 7. *Vanek J.* PackMerger: a 3D print volume optimizer [Текст] / *J. Vanek, J. Garcia, B. Benes, R. Mech, N. Carr, O. Stava, G. Miller* // *Computer Graphics Forum* 33, 6. — 2014. — P. 322—332. 8. *Ruizhen Hu.* Approximate pyramidal shape decomposition [Текст] / *Hu Ruizhen, Li Honghua, Zhang Hao, Cohen-Or. Daniel* // *A CMTrans on Graph* 33, 6. — 2014. — P. 12. 9. *Shamir, A.* A survey on mesh segmentation techniques [Текст] / *A. Shamir* // *Computer Graphics. Forum* 27, 6. — 2008. — P. 1539—1556. 10. *Hao J.* An efficient curvature-based partitioning of large-scale STL models [Текст] / *J. Hao, L. Fang, R. Williams* // *Rapid Prototyping Journal.* — 2011. — 17, 2. — P. 116—127. 11. *Luo L.* Chopper: Partitioning Models into 3D-Printable parts [Текст] / *L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewicz, W. Matusik* // *ACM Transactions on Graphics.* — 31(6). — 2012. — 9 p. 12. 3D (three-dimensional) printing-oriented model decomposition and arrangement method [Текст]: Пат. 105427374 Chine: МПК B33Y50/02, G06T17/00 / *Chen Xuelin, Lyu Lin, Chen Baoquan.* — № CN20151762458; заявл. 10.11.2015; опубл. 23.03.2016. 13. *Xuelin C.* Dapper: decompose-and-pack for 3D printing [Текст] / *Chen, Xuelin et al.* // *Acm transactions on graphics.* — 2015. — vol. 34, no. 6, 4. — 12 p. 14. *Barnawal, Prashant.* Design and evaluation of feedback system in design for manufacturability [Текст]. Graduate Theses and Dissertations. 14789. — 2015. — <http://lib.dr.iastate.edu/etd/14789>.

Надійшла до редколегії 25.06.2018